

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIA TEADUSKOND

Füüsika instituut

Jorma Veiderpass

**HELIANEMOMEETRI MÕÕTMISANDMETEST
MIKROMETEOROLOOGILISTE PARAMEETRITE ARVUTAMINE**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Erko Jakobson, PhD

Tartu 2015

Sisukord

Kasutatud lühendid.....	3
1 Sissejuhatus.....	4
2 Kirjanduse ülevaade	5
2.1 Tuul.....	5
2.1.1 Tuule mõõtmine	5
2.2 Atmosfääri piirkiht	7
2.3 Atmosfääri stabiilsus	7
2.4 Pöörised	8
3 Andmeanalüüsi metoodika.....	10
3.1 Metoodika.....	10
3.1.1 Dispersioon ja kovariatsioon.....	10
3.1.2 Turbulentse kovariatsiooni meetod	10
3.2 Vood	13
3.2.1 Hõõrdekiirus.....	14
3.2.2 Impulsi voog.....	14
3.2.3 Tajutava soojuse voog.....	14
3.2.4 Stabiilsuse parameeter.....	15
4 Kasutatavad andmed	17
4.1 Helianemomeetri andmete filtreerimine	17
5 Tulemused.....	19
6 Kokkuvõte.....	22
7 Tänuavaldused	23
8 Kasutatud kirjandus	24
9 Summary	26
10 Lisad.....	27
10.1 Andmerea näide	27
10.2 Pythoni kood.....	28
11 Lihtlitsents.....	34

Kasutatud lühendid

F_S^{EC}	turbulentse kovariatsiooni meetodiga leitud voog
d_{pl}	helianemomeetri anduritevaheline kaugus
$t_{1,2}$	helilaine levimise aeg
u_{pl}	tuule kiirus piki andurite telge
$\vec{\nabla}$	divergents $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$
ρ_d	kuiva õhu tihedus
Δ	Laplace'i operaator
H	tajutava soojuse voog
L	Obukhovi kõrgus
κ	von Karmanni konstant
c	helikiirus
cov	kovariatsioon
τ	impulsi voog
ζ	uuritav suurus
ζ_S	stabiilsuse parameeter

1 Sissejuhatus

Tuuleks nimetatakse õhurõhu erinevuste tõttu liikuvat õhku. Tuult klassifitseeritakse selle kiiruse, põhjustajate, asukoha ja efekti alusel. Meteoroloogias kasutatakse tuulte iseloomustamiseks nende tugevust ja suunda, kust tuul puhub. Kaks põhilisemat tegurit, mis põhjustavad suureskaalalisi õhu tsirkulatsioone atmosfääris, on selle erinev soojenemise kiirus ekvaatoril ja poolustel ning planeedi pöörlemine [1,2].

Mõõtmaks atmosfääris toimuvaid soojuse, massi ja impulsi vahetusprotsesse pakuti turbulentse kovariatsiooni meetodit juba 20. sajandi keskel. Mõõtmisi takistas sel ajal sobiva meteoroloogilise instrumentatsiooni puudumine. Polnud mõõteriista, mis suudaks teostada piisavalt kiireid mõõtmisi, mida oleks võimalik võrrelda. Probleemile leiti osaline lahendus, kui arendati välja esimesed ultraheliga töötavad anemomeetrid. Need on võimelised mõõtma tuult kolmedimensionaalselt, võttes lugemeid lühikeste, alla sekundi kestvate ajaperioodide tagant. Mõõtmised intensiivistusid 1990. aastatel, kui arendati välja uue generatsiooni helianemomeetrid, millega sai tuule parameetreid uurida pidevalt. Mõõtmisi toetasid ka erinevad gaaside analüsaatorid, mis hindasid veeauru ja süsinikdioksiidi sisaldusi atmosfääris. 2000. aastal kirjutati ka esimene üldisem teatmik mikrometeoroloogia vallas (Aubinet, 2000), mis omas suurt tähtsust valdkonna arengule ja laiemale levikule [3].

Antud töö eesmärkideks on:

- anda ülevaade turbulentsuse parameetritest ning voogudest, mida saab helianemomeetri mõõtmisandmetest arvutada;
- koostada arvutusprogramm helianemomeetri mõõtmisandmetest turbulentsuse parameetrite ning voogude arvutamiseks ja
- uurida keskmistamise perioodi mõjusid tulemustele.

2 Kirjanduse ülevaade

2.1 Tuul

Tuul on õhu horisontaalne liikumine, mis on põhjustatud õhurõhu erinevustest maapinna erinevate alade kohal. Õhk liigub kõrgema rõhuga aladelt madalama rõhuga alade poole ning mida suurem on rõhkude erinevus, seda tugevam tuul sellega kaasneb. Tuult iseloomustavad suund, kiirus ja puhangulisus [1,2].

Tuule mõõtmine on ilmaennustuse juures üks tähtsamaid elemente. Peale selle on veel teisigi valdkondi, kus tuule parameetrite teadmine võib osutuda väga tähtsaks. Näidetena võib tuua saasteainete leviku uurimise, kõrgete ehitiste või tuulegeneraatorite ehitamise, laeva- ja lennuliikluse planeerimise, põllumajanduse ning inimeste igapäevaelu [4].

2.1.1 Tuule mõõtmine

Tuule mõõtmises on tänapäevaks välja kujunenud väga mitmeid meetodeid. Meteoroloogilistes mõõtmistes kasutatakse traditsioonilisi ehk ajalooliselt esimesena kasutusele võetud seadmeid: kaussanemomeetrit, kuuma traadi anemomeetrit või tuulelippu. Samuti on kasutusel ka tehnoloogiliselt oluliselt keerukamad seadmed (mittetraditsioonilised seadmed): heli- ja laseranemomeetrid ning keerulised radarisüsteemid. Viimaseid nimetatakse ka sagedusnihke anemomeetriteks, sest need mõõdavad elektromagnetlainete nihkeid sõltuvalt tuulest. Mittetraditsiooniliste seadmete eeliseks traditsiooniliste ees on võime mõõta samaaegselt tuule kiirust ja suunda. Lisaks on need täpsed nii tugevate tuulepuhangute kui ka nõrkade õhuvoolude korral [5].

Hoolimata nüüdisaegsete anemomeetrite arvukatest eelistest, on meteoroloogilistes mõõtmistes siiani levinuimad instrumendid kaussanemomeetrid oma lihtsa ehituse ja odavuse tõttu. Atmosfääriuuringutes on oluline aga mõõtmisseadmete töökindlus, seetõttu eelistatakse mittetraditsioonilisi vahendeid. Näiteks helianemomeetritel puuduvad liikuvad osad ning seetõttu puudub kulumisest tingitud kalibreerimisvajadus [5].

2.1.1.1 Helianemomeetrid

Helianemomeetrid koosnevad ultraheli anduritest, mis on üheaegselt nii saatjad kui ka vastuvõtjad. Saatjad tekitavad ultraheliimpulssi ning sensorid registreerivad neid. Kaheosalised andurid on asetatud selliselt, et ühes seadmes tekitatud ultraheliimpulss jõuaks teiseni. Lähtudes impulsi kohalejõudmise ajast, saatja ja vastuvõtja vahelisest kaugusest ning heli levimise kiirusest õhus, arvutatakse välja tuule kiirus. Enamasti on helianemomeetritel kolm erinevas suunas orienteeritud mõõtepeade paari. Nende mõõdetud tuule kiiruse andmete põhjal leitakse ka tuule suund ning klassikalised (x, y, z) tuule kiiruse komponendid. Lähtudes seadme suure sagedusega (tavaliselt 10–60 Hz) mõõdetud tuule kiiruse andmetest, on võimalik arvutada väga erinevaid mikrometeoroloogias huvipakkuvaid parameetreid [5].

Lisaks kolmemõõtmelistele (täielikele) helianemomeetritele on kasutusel ka kahemõõtmelised (mittetäielikud) helianemomeetrid, mis mõõdavad ainult horisontaalseid tuulekomponente. Kahemõõtmelised helianemomeetrid on odavamad, seetõttu eelistatakse vähenõudlike mõõtmiste teostamisel enamasti neid. Antud töö raames uuritakse ainult täielikke helianemomeetreid, kuna mittetäielike helianemomeetrite mõõtmisandmetest arvutatavate parameetrite valik on oluliselt kitsam [5].

Ultraheli anemomeetri tööpõhimõte on mõõta aega, mis kulub ultrahelisignaali levimiseks omavahel teadaoleval kaugusel anduriteni. Levimise aeg sõltub helikiirusest ning õhu liikumise kiirusest lainepaketi teel. Kahe anduri sihis oleva tuule kiiruse arvutamiseks kasutatakse valemeid:

$$u_{pl} = \frac{d_{pl}}{2} \left(\frac{1}{t_{1,2}} - \frac{1}{t_{2,1}} \right), \quad (1)$$

$$c = \frac{d_{pl}}{2} \left(\frac{1}{t_{1,2}} + \frac{1}{t_{2,1}} \right), \quad (2)$$

kus u_{pl} – tuule kiirus piki andurite telge [m/s];

d_{pl} – anduritevaheline fikseeritud kaugus [m];

c – helikiirus [m/s];

$t_{1,2}$ – ultraheli impulsi levimise aeg esimesest andurist teise [s];

$t_{2,1}$ – ultraheli impulsi levimise aeg teisest andurist esimesse [s] [3].

Helikiirus on funktsioon õhu tihedusest, mis sõltub õhu temperatuurist ja gaaside, eriti veeauru, osakaalust õhus [3].

Siiski pole helianemomeetrid ideaalsed ning masinate töös võib esineda vigu. Näiteks võib helisignaali leviku aega häirida tugev ristituul andurite telgedega (eriti tuntav on see efekt vanemate mõõteriistadega). Teiseks võib mõõtmisi segada anemomeetri enda konstruktsioon, tekitades väiksemaid keeriseid andurite läheduses. Samuti võib saadud tulemuste täpsust mõjutada ka vastav mast, kuhu mõõteriist on kinnitatud. Kõiki neid probleeme üritavad tootjad uute mõõteseadmete väljatöötamisel arvestada. Selleks teostatakse nii riist- kui ka tarkvaralisi uuendusi [5].

2.2 Atmosfääri piirkiht

Atmosfääri ehk planetaarseks piirkihiks nimetatakse seda osa atmosfäärist, mis on aluspinnast enim mõjutatud. Atmosfääri alumiseks piiriks on maapind. Piirkihi paksus muutub ajas ja ruumis pidevalt. See sõltub aluspinna poolt põhjustatud segunemise intensiivsusest (300 m – 2 km). Päeval, kui Päike soojendab maapinda, toimub soojuse ülekanne ülespoole atmosfääri. Sel ajal võib piirkiht ulatuda ühe kuni kahe kilomeetrini. Öösel, kui maapind jahtub, on soojusvoog suunatud maapinna poole, ning piirkiht ulatub vahel vaid 100 meetrini. Need on ideaaljuhud. Tegelikult võivad piirkihi paksust mõjutada ka suuremastaabilised ilmasüsteemid, mis toovad endaga kaasa tugevaid tuuli ning pilvisust [6].

Piirkihi lõpetab stabiilne inversioonikiht. Sellest kõrgemal on ülejäänud osa troposfäärist, mida nimetatakse ka vabaks atmosfääriks. Inversioonikiht ei lase õhuturbulentsidel, -niiskusel ning õhus vabalt lendlevatel osakestel, nagu õietolm ja tahmaosakesed, levida piirkihist kõrgemale. Õhuturbulentsid on piirkihis ühtlaselt kõikjale jaotunud. Need põhjustavad saateainete levimist ja hajumist. Turbulentne kommunikatsioon aluspinna ja õhu vahel toimub väga kiiresti. Seetõttu on õhul pidevalt aluspinnast mõjutatud omadusi [6].

2.3 Atmosfääri stabiilsus

Atmosfääri stabiilsuse kirjeldamisel defineeritakse kujuteldav väike õhuelelement, näiteks 1 m^3 , ning asetatakse seda atmosfääris erinevatele vertikaalsetele kõrgustele. Selles õhuelelemendis olev osakeste arv on ajas konstantne: parameetrite muutumise korral ei lenda osakesed atmosfääri laiali ehk välise õhuga segunemist ei toimu [2].

Kõikidel süsteemidel või objektidel võib esineda kolm erinevat tasakaalulist olekut: stabiilne, ebastabiilne või indiferentne tasakaaluolek. Stabiilne tasakaal õhuelelemendi jaoks tähendab, et vertikaalse häirituse korral pöördub see oma algsele kõrgusele tagasi. Ebastabiilse tasakaalu korral ei taastu häirituse korral algolukord, vaid häiritus kasvab kõrgusega üha enam. Indiferentse, ehk ükskõikse tasakaalu olukorras ei liigu õhuelelement häirituse korral ei algolekusse ega ka sellest järjest kaugemale, vaid jääb uuele tasemele püsima [2].

Atmosfääri stabiilsuse määramisel võrreldakse tõusva õhuelelemendi temperatuuri seda ümbritseva õhu temperatuuriga. Õhuelelemendi tõustes see paisub, sest kõrgemal on rõhk madalam, ning jahtub, kuna paisumiseks tehakse siseenergia arvelt tööd. Laskudes surutakse õhuelelement välise rõhu poolt kokku ning selle temperatuur tõuseb. Mõlemad protsessid toimuvad adiabaatilisel, mis tähendab, et väliskeskkonnaga soojusvahetust ei toimu [2].

Kui õhuelelemendi temperatuur on madalam võrreldes väliskeskkonnaga, siis õhuelelement, olles raskem, langeb tagasi oma algsele tasemele. Tegu on stabiilse tasakaaluolekuga, kus ülespoole suunatud liikumist takistatakse. Kui tõusev õhuelelement on soojem kui ümbritsev keskkond, siis jätkab see tõusmist seni, kuni saavutab väliskeskkonnaga sama temperatuuri. Tegu on ebastabiilse tasakaaluga. Indiferentse tasakaalu korral muutuvad õhuelelemendi parameetrid samasuguse kiirusega kui välisel õhul. Seetõttu ei teki tiheduste erinevustest tulenevat üles ega alla lükkavat jõudu [2].

Atmosfääri stabiilsust mõjutavad õhukeerised, mis segavad sooja ja külma õhku. Seetõttu jaotub õhukiht ringi nii, et kihi ülemine pool jahtub ja alumine osa soojeneb, mistõttu muutub kogu kiht ebastabiilsemaks [2].

Enamasti on ebaühtlase soojenemise tõttu päeval ajal atmosfäär ebastabiilselt kihistunud ning öösi, kui maapind on juba jahtunud esineb tihti stabiilne kihistus [2].

2.4 Pöörised

Turbulentside kirjeldamine atmosfääris on keeruline probleem. Turbulentne voolamine on tugevasti pööriseline ning sisaldab endas palju erinevaid keeriselise olemusega kolmemõõtmelisi liikumisi. Selliseid liikumisi pole võimalik diferentsiaalvõrranditega kirjeldada. Seetõttu on levinuim viis nende kirjeldamiseks kasutades pööriseid. Pööris on abstraktne mõiste kirjeldamaks kvalitatiivselt turbulentse. Pöörised pole selgelt defineeritud struktuuri või iseloomuga voolamise osad. Nende uurimiseks ei saa neid teineteisest eraldada ning üksikult jälgida [7,8].

Tuginedes voolamiste visualiseerimiste uuringutele, turbulentside statistilistele analüüsidele ja üldtunnustatud teoreetilistele ideedele, arvatakse turbulentne voolamine koosnevaks erinevates suurustes pööristest. Pööriste suurused varieeruvad alates väiksematest, millel on piisavalt suur energia ületamaks keskkonna viskoossuse dissipatiivsed jõud, kuni suurte pööristeni, mis on piiratud voolamise geomeetriaga. Atmosfääri piirkihis on pöörised vahemikus 10^{-3} kuni 10^3 m [7,8].

Briti meteoroloog Lewis Fry Richardson on 1920. aastal pakkunud, et turbulents on selline protsess, kus peamist energiat omav pööris saab oma kineetilise energia otse, ning seejärel annab energiat kaskaadina edasi väiksematele pööristele, mis hajutavad saadud energia soojuseks. Seega, et pöörise energia ei lõppeks, peab see mingist allikast pidevalt energiat juurde saama tasakaalustamaks soojuseks hajunud energia osa. Selliseks allikaks võib olla konvektsioon: atmosfääri ebastabiilse kihistatuse korral hakkab soe õhk vertikaalselt ringlema, et saavutada stabiilne kihistus. Taoline õhu liikumine põhjustab suurte pööriste teket. Keskmise hajunud energia hindamine võib sellisel juhul olla keeruline, kui ei tehtaks väga olulist eeldust: energia hajumine turbulentsi piires on teatavas lähenduses isotroopne. Seega pole vaja turbulentside kirjeldamisel muretseda selle täpsete detailide pärast, vaid üldisest mõjust energiale, soojuse vahetusele, õhuosakeste impulsile [7,8].

3 Andmeanalüüsi metoodika

3.1 Metoodika

3.1.1 Dispersioon ja kovariatsioon

Dispersioon näitab, kui kaugel asub iga element andmete keskmisest väärtusest, ehk andmete hajuvust keskmisest. Dispersioon suvalisest N -liikmelisest andmehulgast leitakse järgnevalt:

$$s_{N-1}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \quad (3)$$

kus \bar{x} on vastava muutuja keskväärts [9].

Kovariatsioon näitab, kui tugevalt on kaks või rohkem andmete hulka omavahel seotud. Kovariatsiooni arvutusvalem andmete hulkade X ja Y kohta elementide arvuga N , saab avaldada järgnevalt:

$$\text{cov}(X, Y) = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N}, \quad (4)$$

kus \bar{x} ja \bar{y} on vastavate muutujate keskväärtsed. Erijuhul, kui $Y = X$, saab kovariatsioonist tavaline dispersiooni arvutamise juht [9].

3.1.2 Turbulentse kovariatsiooni meetod

Turbulentse kovariatsiooni mõõtmised teostatakse üldiselt atmosfääri piirkihis. Piirkihi ulatuses on vood ligikaudu konstantsed, ning need on mõjutatud mõõtekohta ümbritseva maapinna omadustest (taimkate, ehitised, mäed jne). Piirkihis on peamiseks energia transpordimehhanismiks turbulentsid, õhuosakeste molekulaarne liikumine on teisejärguline. See õigustab turbulentse kovariatsiooni meetodi rakendamist voogude arvutamisel [3].

Mikrometeoroloogias kasutatakse aegrea andmete korral Reynoldsi eraldamist, kus jaotatakse andmed ajaliseks keskmiseks $\bar{\zeta}$ (muutumatu komponent), ja muutuvaks osaks ζ' (häirituse komponent) [3].

$$\zeta = \bar{\zeta} + \zeta', \quad (5)$$

kus ζ – uuritav suurus;

$\bar{\zeta}$ – uuritava suuruse ajaline keskmine;

ζ' – uuritava suuruse häirituse komponent [3].

Ajaline keskmine leitakse üle kindla andmete perioodi:

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \zeta(t) dt, \quad (6)$$

kus T – keskmistamise periood [3].

Reynoldsi eraldamisel kehtivad keskmise arvutamiseks teatavad reeglid, mida kutsutakse Reynoldsi postulaatideks. Viimased on tõesed ainult juhul, kui keskmised on arvutatud üle ansamblite, ehk üle väiksemate andmete hulkade. Paraku atmosfäärimõõtmiste korral pole see tingimus kunagi täidetud. Seetõttu arvutatakse keskmised üle statistiliste suuruste aegrea ning arvutamisel kasutatakse ergoodsuse hüpoteesi. Viimane kehtestab, et ajalised keskmised on võrdsed üle ansamblite arvutatud keskmistega. Et see tingimus oleks täidetud, peavad häiritused olema statistiliselt muutumatud üle keskmistamise perioodi [3].

Iga skalaarse või vektorsuuruse ζ jaoks atmosfääris saab kirjutada võrrandi:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho_d \zeta}{\partial t}}_I + \underbrace{\vec{\nabla}(\vec{u} \rho_d \zeta)}_{II} + \underbrace{K_\zeta \Delta(\rho_d \zeta)}_{III} = \underbrace{S_\zeta}_{IV}, \quad (7)$$

kus \vec{u} – tuule kiiruse vektor;

$\vec{\nabla}$ – divergents $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$;

Δ – Laplace'i operaator;

ρ_d – kuiva õhu tihedus [g/cm^3];

K_ζ – suuruse ζ molekulaarne difusiooni määr;

S_ζ – allika- või neelukoha intensiivsus [3].

Valem 7 näitab, et suuruse ζ muutumise määr (I) võib sõltuda selle transpordist atmosfääris (II) molekulaarse difusiooni tõttu (III) ja allika- või neelukohtades ζ juurdetekkimest või kadumist sellesse infinitesimaalsesse ruumalasse (IV), kus seda kirjeldatakse. Seda valemit võib rakendada nii skalaarsele suurusele, kui ka vektoriaalsele suurusele, kui vastavad allikate

tingimused on defineeritud. Võttes ζ võrdseks ühega, on tegu pidevuse võrrandiga. Kui ζ on atmosfääri komponendi (näiteks veeaur, süsinikdioksiid) segunemise määr, saab valemist 7 skalaarne jäävuse võrrand. Kui aga rakendatavaks suuruseks valida kiiruse vektori komponent kindlas suunas, väljendab valem 7 sama suuna impulsi komponendi jäävust. Kolm võrrandit, mis kirjeldavad impulsi jäävust kõigis kolmes suunas, defineerivad Navier'-Stokes'i võrrandid [3].

Asendades suuruse ζ valemis 7 tuule kiiruse komponendiga kindlal suunal u_i , saame impulsi jäävuse võrrandi sellel suunal:

$$\frac{\partial \rho_d u_i}{\partial t} + \vec{\nabla}(\vec{u} \rho_d u_i) = S_i. \quad (8)$$

Allikalisus S_i antud valemis vastabki impulsi juurdetekkimisele ehk jõududele [3].

Atmosfääri piirkihis õhuelelemendile mõjuvateks jõududeks on hõõrdejõud, rõhugradient, Coriolise jõud, gaasi viskoossusjõud ja üleslükkejõud. Kolm esimest võib jätta arvestamata horisontaalselt homogeense pinna korral. Üleslükkejõudu peab arvestama ainult vertikaalse impulsi komponendi korral. Kuna impulsi horisontaalne komponent on paralleelne keskmise tuule suunaga, mis on piirkihis domineeriv, jäetakse ka üleslükkejõud arvestamata. Cartesiuse koordinaatsüsteemis (x, y, z) , kus x vastab horisontaalsele komponendile, mis on paralleelne keskmise tuule liikumise suunaga, y vastab horisontaalsele, keskmise tuule liikumise suunaga risti olevale komponendile ja z vertikaalsele komponendile. Vastavalt nimetatakse muutujad ümber: u, v, w – tuule kiiruse komponendid. Seega saab valemi 8 ümber kirjutada:

$$\frac{\partial \rho_d u}{\partial t} + \frac{\partial \rho_d u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_d vu}{\partial y} + \frac{\partial \rho_d wu}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

Rakendades Reynoldsi eraldamist ja järgnevaid lihtsustusi:

$$I \left| \frac{p'}{\bar{p}} \right| \ll \left| \frac{\rho'_d}{\bar{\rho}_d} \right|; \quad (10)$$

$$II \left| \frac{p'}{\bar{p}} \right| \ll \left| \frac{\theta'}{\bar{\theta}} \right|; \quad (11)$$

$$III \left| \frac{\rho'_d}{\bar{\rho}_d} \right| \ll 1; \quad (12)$$

$$IV \left| \frac{\theta'}{\bar{\theta}} \right| \ll 1; \quad (13)$$

kus p on rõhk ja θ õhu temperatuur, saab valemi 9 ümber kirjutada:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial z} = 0. \quad (14)$$

Valem 12 on Boussinesq'i lähendus, mis jätab arvestamata tiheduse muutused, välja arvatud üleslükkejõud, sest raskuskiirendus on võrdlemisi suur, võrreldes teiste kiirendustega impulsi võrrandis [3].

Valides nüüd sellise koordinaatsüsteemi, kus \bar{v} ja \bar{w} on nullid, eeldades horisontaalset homogeensust ja ajas muutumatuid (statsionaarseid) tingimusi (ajaline tuletis on null), saadakse seos:

$$\frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial z} = 0, \quad (15)$$

kus $\bar{w}'u'$ on turbulentse kovariatsiooni liige. Valem 15 näitab, et tehtud eelduste korral on see voog kõrgusega konstantne, samuti ka vertikaalse impulsi voogu läbi horisontaalse tasandi. Sellist lähenemist nimetataksegi turbulentse kovariatsiooni meetodiks (ingl. *Eddy Covariance Method*) [3].

3.2 Vood

Voog on defineeritud kui mingi suuruse ζ liikumine läbi ühikulise kinnise pinna ühikulise ajaperioodi vältel. Voog sõltub pinda läbivast hulgast, läbitava ala pindalast ja ajast, mis kulub sellel hulgal pinna läbimiseks. Kui summaarne voog on pinnast eemale, on tegu allikakohaga, näiteks veekogud on läbi auramise õhu jaoks veeauru allikakohad. Vastupidisel juhul on tegu neelukohtadega, näiteks taimed neelavad fotosünteesi käigus õhust süsinikdioksiidi [10].

Vertikaalseid turbulentseid vooge saab esitada iga skalaari χ_s ja vertikaalse tuule kiiruse kovariatsiooni korrutisena. Üldine voogude arvutamise valem:

$$F_s^{EC} = \bar{\rho}_d \cdot \overline{w'\chi_s'}, \quad (16)$$

kus ρ_d – kuiva õhu tihedus [kg/m^3];

w' – vertikaalne tuule kiiruse komponent (z) [m/s];

χ_s' – uuritav skalaarne suurus [3].

Primmiidega muutujad on Reynoldsi eraldamisest häirituse komponendid ning katusega ajalised keskmised [3].

Positiivsed voogude tihedused tähendavad massi ja energia ülekannet atmosfääri (maapinnast eemale) ning negatiivsed voogude väärtused vastupidist [11].

3.2.1 Hõõrdekiirus

Hõõrdekiirus iseloomustab gaasi erineva tihedusega kihtidevahelise lõikumise intensiivsust kihtide piirpinnal, ning näitab, kui tugevalt on gaasi voolamine turbulentne [12].

Impulsi voo arvutamisel tuleb eelnevalt defineerida hõõrdekiirus $u_*[m/s]$:

$$u_*^2 = \sqrt{\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2}}, \quad (17)$$

kus u' – horisontaalne tuule kiiruse komponent (x) [m/s];

w' – vertikaalne tuule kiiruse komponent (z) [m/s];

v' – horisontaalse tuulega samas tasandis risti olev komponent (y) [m/s] [13].

3.2.2 Impulsi voog

Õhu liikumisel tekkivad keerised on võimelised õhu osakeste vahel edasi kandma impulssi, selle hindamiseks leitaksegi impulsi voog τ :

$$\tau = -\rho_a u_*^2, \quad (18)$$

kus ρ_a – õhu tihedus [kg/m^3];

u_* – hõõrdumise kiirus [m/s] [3].

3.2.3 Tajutava soojuse voog

Tajutava soojuse voog võrdub keskmine õhu tihedus korrutatud tuule vertikaalkomponendi ja temperatuuri häiritusosade kovariatsiooniga. Energia ühikud saadakse, kui tuuakse sisse erisoojus konstantsel rõhul. Tajutava soojuse voog H [W/m²] on:

$$H = \overline{\rho_a} C_p \overline{w' T_s'}, \quad (19)$$

kus $\overline{\rho_a}$ – keskmine õhu tihedus [kg/m³];

C_p – õhu erisoojus jääval rõhul [J/K];

T_s' – keskmine anemomeetri tuulekiirustest arvatud temperatuur [K] on absoluutse temperatuuriga seotud läbi järgneva valemi:

$$T_s' = T \left(1 + 0,32 \frac{e}{p} \right), \quad (20)$$

kus T – õhu absoluutne temperatuur [K];

e – veeauru rõhk [Pa];

p – õhurõhk [Pa] [3].

3.2.4 Stabiilsuse parameeter

Atmosfääri kihistuse stabiilsust näitab dimensionoonitu stabiilsuse parameeter ζ_s :

$$\zeta_s = \frac{h_m - d}{L}, \quad (21)$$

kus h_m – mõõtmise kõrgus [m];

d – kõrgus maapinnast, kus lõppevad tuult takistavad objektid (taimkate, ehitised) [m];

L – Obukhovi kõrgus [m] [3].

Obukhovi kõrgus on defineeritud:

$$L = - \frac{u_*^3}{\kappa \cdot \left(\frac{g}{\theta_s} \right) \cdot \overline{w' \theta_s'}}, \quad (22)$$

kus u_* – hõõrdekiirus [m/s];

κ – von Karmanni konstant;

g – raskuskiirendus [m/s²];

θ_s – tuule kiirustest arvatud temperatuur [K];

w' – tuule vertikaalse komponendi häiritusliige [m/s] [3].

Von Karmanni konstandi väärtuseks on eksperimentaalselt määratud 0,4 ning see on universaalne kõikidele pindkihtide jaoks. Obukhovi kõrguse absoluutväärtus tähistab pinnakihi paksust, kus erinevate kihtidevahelise lõikumise ja hõõrdumisega tuleb arvestada [7].

4 Kasutatavad andmed

Töös kasutatavad andmed on saadud helianemomeetrite mõõtmistest, mis on kinnitatud Valgjärvel asuva endise telemasti külge (Pikareinu, Põlva maakond, 58,097165N; 26,678074E). Masti küljes on neli ühesugust seadet, eri kõrgustel: 25 m, 50 m, 110 m, 200 m. Antud töös kasutatakse andmeid, mis on mõõdetud 50 m kõrgusele kinnitatud helianemomeetriga. Seadme tüüp on uSonic-3 klass A, kolmemõõtmeline helianemomeeter. Kuna Valgjärvel ei mõõdetud õhurõhku, kasutati samal ajaperioodil linnulennult 23 km kaugusel oleva Riigi Ilmateenistuse Tartu – Tõravere ilmajaamas (58,264N; 26,462E) teostatud mõõtmisandmeid. Uuritav ajavahemik on 13. jaanuari õhtust kuni 21. jaanuari keskpäevani 2015.

Helianemomeeter on seatud mõõtma andmeid sagedusega 40 Hz. Mõõdetud andmetest arvutatakse iga sekundi kohta keskväärtused, parameetritevahelised kovariatsioonid ning standardhälbed, mis salvestatakse. Keskmistatud andmete kuju koos näidisandmetega on toodud lisana (vaata lisa 10.1).

Töös teostatava andmeanalüüsi eesmärk on demonstreerida arvutusprogrammi võimalusi. Sisulist analüüsi võimaldava mahuga andmebaasi ettevalmistamine ei mahtunud antud töö raamidesse.

4.1 Helianemomeetri andmete filtreerimine

Helianemomeetri andmete filtreerimiseks kasutati lihtsat seost tuvastamaks piike, mis on suuremad kui mingi arv korda standardhälbeid. Võrreldi suuruse χ häirituskomponendi absoluutväärtust vastava perioodi pealt arvutatud standardhällbega:

$$|\chi - \bar{\chi}| \geq D \cdot \sigma \quad (23)$$

kus D – diskriminatsiooni konstant;

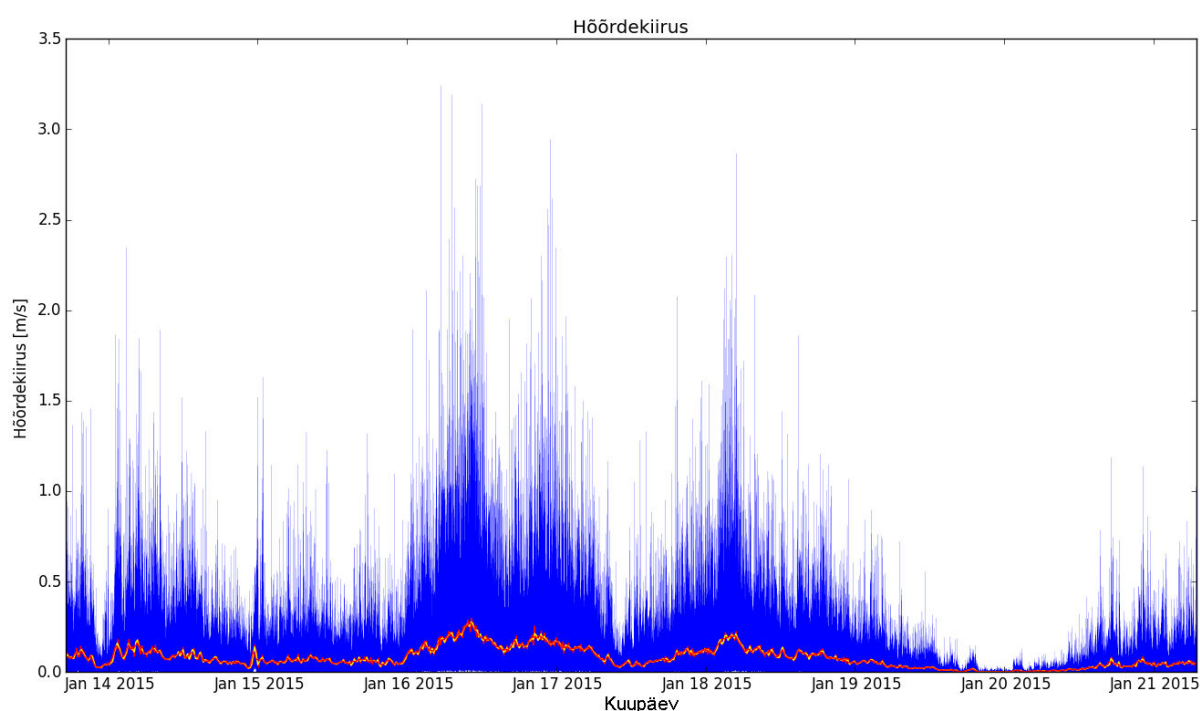
σ – standardhälve [3].

Diskriminatsioonikonstandi väärtuseks antud töös valiti 1 (sõltub andmetest), sest andmetes olid kohati liiga suured piigid, kõrgema D väärtuse korral jäid filtreeritud andmetesse kohati

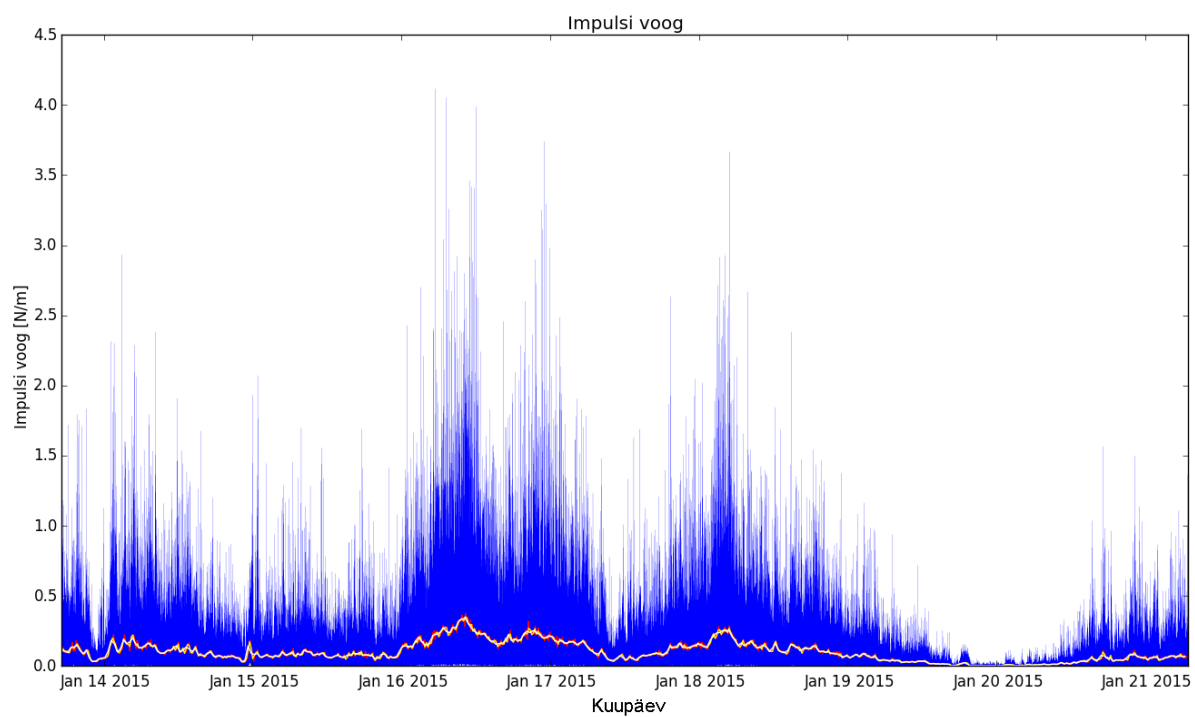
liiga suured piigid, mis on arvatavalt mõõtemüra. Filtreerimine toimus üle keskmistamise perioodi, ehk standardhälbed ja keskmised väärtused leiti üle määratud perioodi. Selgelt vigased andmed (näiteks väärtusega 10^{24}), mis läbisid testi (keskmistamise periood liiga lühike), eemaldati käsitsi [3].

5 Tulemused

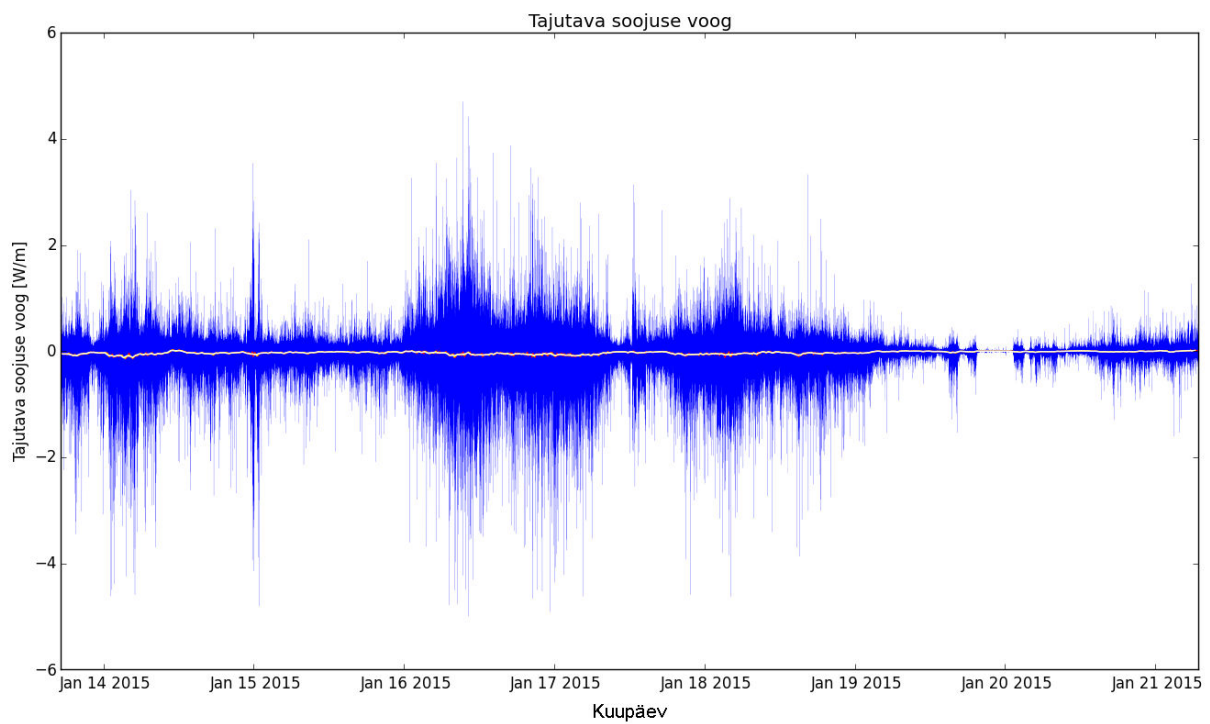
Arvutusprogrammiga (vaata lisa 10.2) nädisandmetest arvatud hõrdekiirus, impulsi voog ning tajutava soojuse voog on toodud joonistel 1 – 3. Andmetest on suuremad piigid eraldatud kasutades punktis 4.1 kirjeldatud algoritmi. Andmeid keskmistati perioodidega 15, 30 ja 60 minutit, kuid tulemused sellest oluliselt ei muutunud, nagu on näha ka joonistelt. Teoreetiliselt peaks keskmistamisperioodi valik tulemusi rohkem mõjutama suurematel kõrgustel [14].



Joonis 1. Hõrdekiirus [m/s]. Sinise joonega on märgitud ühe sekundilise resolutsiooniga andmed, punase joonega on toodud 15 minuti, kollasega 30 minuti ja valgega 60 minuti keskmised väärtused.



Joonis 2. Impulsi voog [N m^{-2}]. Sinise joonega on märgitud ühe sekundilise resolutsiooniga andmed, punase joonega on toodud 15 minuti, kollasega 30 minuti ja valgega 60 minuti keskmised väärtused.



Joonis 3. Tajutava soojuse voog [W m^{-2}]. Sinise joonega on märgitud ühe sekundilise resolutsiooniga andmed, punase joonega on toodud 15 minuti, kollasega 30 minuti ja valgega 60 minuti keskmised väärtused.

6 Kokkuvõte

Antud töö referatiivses osas on toodud ülevaade turbulentsuse parameetritest ning voogudest, mida saab helianemomeetri mõõtmisandmetest arvutada, kasutades turbulentse kovariatsiooni meetodit. Töö sisuliseks osaks oli helianemomeetri salvestatud andmetest mikrometeoroloogiliste parameetrite (hõõrdekiirus, impulsi ning tajutava soojuse vood) arvutamiseks vajaliku arvutusprogrammi koostamine, kasutades programmeerimiskeskonda Python (vaata lisa 10.2). Tulemuste osas on toodud Valgjärve teletorni 50 m kõrgusel oleva helianemomeetri mõõtmisandmetest arvutatud hõõrdekiiruse, impulsi voo ning tajutava soojuse voo joonised ühe nädala (ca 600 000 punkti) pikkuse perioodi kohta. Keskmistamise perioodi pikkus tulemusi oluliselt ei mõjutanud.

7 Tänuavaldused

Töö autor avaldab tänu juhendajale Erko Jakobsonile, kelle oskusliku abi ja asjakohaste nõuannetega sai töö valimine võimalikuks. Samuti tänatakse Sander Mirmet, kes andis töötlemiseks mõõtmisandmed ning Piia Posti, kellelt saadi abi terminoloogiliste küsimustega. Tänatakse ka Ida Rahu pideva keelelise kontrolli ja Paap Koemetsa töömoraali hoidmise eest.

8 Kasutatud kirjandus

1. M. Jürissaar, *Meteoroloogia*, 2. trükk, (Greif OÜ, Tartu, Eesti, 2011).
2. C. D. Ahrens, *Meteorology today: An Introduction to Weather, Climate And The Environment*, 9th Edition, (Brooks/Cole CENGAGE Learning, California, USA, 2009).
3. M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale, *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*, (Springer, London, UK, 2012).
4. Gill Instruments Limited, „Why measure wind speed & direction?“ <http://gillinstruments.com/products/anemometer/whymeasurewind.htm>.
5. T. P. Defelice, *Meteorological Instrumentation and Measurement*, (Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 1998).
6. J. M. Wallace, P. V. Hobbs, *Atmospheric Science 2. ed*, (Elviser Inc., California, USA, 2006).
7. S. Pal Arya, *Introduction to Micrometeorology 2nd ed*, (Academic Press, California, USA, 2001).
8. A. H. Lynch, J. J. Cassano, *Applied Atmospheric Dynamics*, (John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, England, 2006).
9. M. R. Spiegel, L. J. Stephens, *Theory and Problems of Statistics*, (McGraw-Hill, New York, USA, 2008).
10. G. Burba, *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications*, (LI-COR Biosciences, Nebraska, USA, 2013).
11. D. Baldocchi, E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, Ch. Bernhofer, K. Davis, R. Evans, J. Fuentes, A. Goldstein, G. Katul, B. Law, X. Lee, Y. Malhi, T. Meyers, W. Munger, W. Oechel, K. T. Paw U, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson, S. Wofsy, „FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem – Scale Carbon Dioxide, Water Vapor and Energy Flux Densities,“ *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 82, 2415 – 2434 (2001).
12. NEPF Environmental Fluid Mechanics Lab, „Transport Processes In The Environment,“ <http://www.mit.edu/course/1/1.061/www/dream/home/>.

13. A. Nordbo, L. Järvi, T. Vesala, „Revised eddy covariance flux calculation methodologies – effect on urban energy balance,“ *Tellus B*, [S.I.], v. 64, ISSN 1600 – 0889 (2012).
14. X. Guo, T. Yang, Y. Sun, „Averaging period effects on the turbulent flux and transport efficiency during haze pollution in Beijing, China,“ *Meteorol. Atmos. Phys.* ISSN 0177-7971 (2015).

9 Summary

Calculation of micrometeorological parameters from sonic anemometer data

Jorma Veiderpass

The theoretical part of the paper gives an overview of turbulence parameters and flux which can be calculated on the measurement data of sonic anemometer. The practical part of the paper involved creating a spreadsheet program to calculate micrometeorological parameters (friction velocity, momentum, and flux of sensible heat) from the data recorded by sonic anemometer. Programming environment Python was used to do this (Appendix 10.2). In the results part of the paper one can find figures of friction velocity, momentum flux and flux of sensible heat per one-week period (ca 600,000 points), calculated from the measurement data of sonic anemometer which is as high as 50 metres in Valgjärve television tower. The length of the averaging period hardly affected the results.

10 Lisad

10.1 Andmerea näide

Helianemomeetri 40 Hz sagedusega mõõtmisandmetest arvutatakse iga sekundi kohta keskväärtused, parameetritevahelised kovariatsioonid ning standardhälbed. Kõik salvestatavad parameetrid koos nädisandmetega on toodud allolevas tabelis:

Tabel 1 Andmerea näide

Indeks	Kirjeldus	Väärtus	Kirjeldus
0	id	234	Mitmes mõõtmine
1	begin time	2015-01-13 17:09:39+02	Mõõtmise algusaeg
2	end time	2015-01-13 17:09:40+02	Mõõtmise lõppaeg
3	station_id	2	Seadme number (2 = 50m)
4	sonic_x	8.79307692307692	Mõõdetud x-telje suunaline tuule kiirus
5	sonic_y	-4.88384615384615	Mõõdetud y-telje suunaline tuule kiirus
6	sonic_z	-1.46025641025641	Mõõdetud z-telje suunaline tuule kiirus
7	sonic_t	1.32564102564103	Arvutatud akustiline temperatuur
8	sonic_cov_xx	0.0429905325443514	Tuule x komponendi dispersioon
9	sonic_cov_xy	-0.00324457593687555	Tuule x ja y komponendi vaheline kovariatsioon
10	sonic_cov_xz	-0.00452485207100572	Tuule x ja z komponendi vaheline kovariatsioon
11	sonic_cov_xt	-0.00333786982248618	Tuule x kompoendi ja akustilise temperatuuri t vaheline kovariatsioon
12	sonic_cov_yy	0.0665570019723916	Tuule y komponendi dispersioon
13	sonic_cov_yz	0.0411426035502966	Tuule y ja z komponendi vaheline kovariatsioon
14	sonic_cov_yt	0.00196785009861955	Tuule y komponendi ja akustilise temperatuuri vaheline kovariatsioon
15	sonic_cov_zz	0.179607626561472	Tuule z komponendi dispersioon
16	sonic_cov_zt	-0.00319598948060418	Tuule z komponendi ja akustilise temperatuuri t vaheline kovariatsioon
17	sonic_cov_tt	0.00878869165023	Akustiliste temperatuuri dispersioon
18	sonic_count	39	Saadetud pakettide loendur
19	incl_roll	2.4940358974359	Seadme x-telje suunaline kaldus
20	incl_roll_var	6.22332676147863e-06	Loodi 1 dispersioon
21	incl_pitch	2.4882358974359	Seadme y-telje suunaline kaldus
22	incl_pitch_var	6.00249837390265e-07	Loodi 2 dispersioon
23	temperature	2.10307692307692	Temperatuur
24	temperature_var	0.00177514792899292	Temperatuuri dispersioon
25	temperature_sens	0.421030769230769	Temperatuurisensori signaali väärtus
26	relhum	83.6992307692308	Suhteline niiskus
27	relhum_var	0.00126863906098151	Suhtelise niiskuse dispersioon
28	relhum_sens	0.836992307692307	Suhtelise niiskuse sensori signaali väärtus
29	count	39	Loendur
30	heater_on	0	Soojendaja olek
31	heater_off	39	Soojendaja olek
32	heater_defect	0	Soojendaja defekt

10.2 Pythoni kood

@author: Jorma
"""

```
import matplotlib.pyplot as plt
import statistics as stat
import math
import datetime
#-----
#Equations
#-----
#Pressure
def p(p0,H,g):
    L=6.5/1000 #[K/m] temperature lapse rate
    T0=288.15 #[K] sea level standard temperature
    M=28.96 #[gm/mol] dry air molar mass
    R=8314 #[gm*m^2/s^2*mol*K] universal gas constant
    p=(p0*100)*((1-(L*H/T0))**((g*M)/(R*L))) #pressure at altitude H
    return p #[2]
#Saturated vapor pressure
def psat(T):
    psat=6.11*(10**((7.5*T)/(T+237.3)))*100 #[Pa];T=[degC]
    return psat #[1]
#Water vapor pressure
def pv(RH,psat):
    pv=(RH/100)*psat #pv=[Pa] #RH-relative humidity(decimal value)
    return pv #[2]
#Density of dry air
def dens(Ts,pv,p):
    Tabs=Ts/(1+0.32*(pv/p))
    Rd=287.05 #J/(kg*degK) == R/md (dry air molar mass md= [kg/mol])
    dens=(p/(Rd*(Tabs+273.15)))*(1-(((0.378*pv)/p))) #pd=[Pa];T=[K];pv=[Pa] dry air
    density
    return round(dens,2) #[2]
#Friction velocity
def frvel(cov_xz,cov_yz):
    frvel=round(math.sqrt((cov_xz**2)+(cov_yz**2)),2)
    return frvel
#Momentum flux
def momflux(rhod,data):
    momflux=rhod*data #[N/m]
    return momflux
#Sensible heat flux
def heatflux(rhod,Cp,cov_wT):
    heatflux=(rhod*Cp*cov_wT) #[W/m]
    return heatflux
#Obukhov length
def L(frvel,k,g,Ts,cov_wTs):
    if cov_wTs==0.0:
        cov_wTs=0.001
```

```

        L=-((frvel**3)*Ts/(k*g*cov_wTs)) #[m]
    else:
        L=-((frvel**3)*Ts/(k*g*cov_wTs))
    return L
#Stability parameter
def stab(H,d,L):
    if L==0.0:
        L=0.0001
        stab=round((H-d)/L,2)
    else:
        stab=round((H-d)/L,2)
    return stab
#Despike function
def spike(data,L):
    D=1 #Discrimination constant
    middle=[]
    output=[]
    x=math.ceil(len(data)/L)
    for i in range(x):
        middle.append(data[(i*L):(i+1)*L])
    for partData in middle:
        mean=round(stat.mean(partData),2)
        stdev=round(stat.stdev(partData),2)
        partDataIndex=middle.index(partData)
        i=0
        for element in partData:
            if "a" not in str(element) or "" not in str(element) or "nan" not in str(element):
                if((abs(element-mean)>=stdev*D)):
                    try:
                        output.append((partData[i-1]+partData[i+1])/2)
                        i+=1
                    except IndexError:
                        output.append((partData[i-1]+middle[(partDataIndex+1)][0])/2)
                        i+=1
                else:
                    output.append(element)
                    i+=1
            else:
                pass
        return output
#Averaging function
def avg(data):
    elem=0;mn=[];loc=[]
    for i in range(0,len(data)):
        if elem<=avgper-1:
            loc.append(data[i])
        if elem==avgper-1:
            uus=sum(loc)/avgper

```

```

        mn.append(uus)
        elem+=1
    elem+=1
else:
    elem=0;loc=[]
return mn
def gen_avg(data,data2):
    index=[]
    for i in range(0,len(data2),avgper+1):
        index.append(data[i])
    if len(index)-len(avg(data2))==1:
        del index[-1]
    return index
def gen(data):
    index=[]
    for i in range(len(data)):
        index.append(i)
    return index
def time(data):
    x=[]
    for i in data:
        year=int(i[0:4])
        month=int(i[5:7])
        day=int(i[8:10])
        hour=int(i[11:13])
        minute=int(i[14:16])
        second=int(i[17:19])
        toDate=datetime.datetime(year,month,day,hour,minute,second)
        x.append(toDate)
    return x
#Constants
R=8.314 #J/mol*K Universal Gas Constant
Cp=20.8+R #J/mol*K Specific Heat at Constant Pressure [3]
H=50 #[m] Station altitude
g=9.8 #[m/s**2] Gravitational constant
k=0.4 #von Karmann constant
d=10 #[m] Obstacle heighth

#-----
#Import data from file
a=open("Andmed.csv","r")
b=open("2015-01.csv","r")
first_lineA=a.readline()
first_lineB=b.readline()
#Empty lists
p0=[];RH=[];Ts=[];T=[];rhod=[]
cov_xz=[];cov_zt=[];cov_yz=[]
tuul_x=[];tuul_z=[];
Obuk=[];stabD=[];timeD=[]
momfluxD=[];heatfluxD=[];frvelD=[]

```

```

#Used data length
ss=620000
aa=0
#Data append
condition=True
ridaB=b.readline()
secnd=(ridaB.split(",")[1]
for ridaA in a:
    if aa>ss:
        break
    aeg=(ridaA.split(",")[0]
    if(aeg not in secnd):
        while(condition):
            try:
                aa+=1
                ridaB=b.readline()
                secnd=(ridaB.split(",")[1]
                if aeg in secnd:
                    condition=False
            except:
                break
    while(aeg in secnd and aa<ss):
        try:
            aa+=1
            ridaB=b.readline()
            secnd=(ridaB.split(",")[1]
            line=ridaA.split(",")
            lineB=ridaB.split(",")
            p0.append(float(line[1]))
            timeD.append(str(lineB[1]))
            cov_xz.append(float(lineB[10]))
            cov_yz.append(float(lineB[13]))
            cov_zt.append(float(lineB[16]))
            Ts.append(float(lineB[7]))
            T.append(float(lineB[23]))
            RH.append(float(lineB[26]))
        except:
            break
    condition=True
a.close();b.close()
#-----
#Average period
avgper=900 #[s]
#-----
#Parameter calculation
for i in range(len(RH)):
    rhod.append(dens(Ts[i],pv(RH[i],psat(T[i])),p(p0[i],H,g)))
    frvelD.append(frvel(cov_xz[i],cov_yz[i]))
    if (isinstance(rhod,str)!=True):
        momfluxD.append(momflux(rhod[i],frvelD[i]))

```

```

        heatfluxD.append(heatflux(rhod[i],Cp,cov_zt[i]))

frvelD=spike(frvelD,avgper)
momfluxD=spike(momfluxD,avgper)
heatfluxD=spike(heatfluxD,avgper)

#for i in range(len(frvelD)):
#    Obuk.append(L(frvelD[i],k,g,Ts[i],cov_zt[i]))
#for i in range(len(Obuk)-1,-1,-1):
#    # if abs(Obuk[i])>10000 or (math.isnan(Obuk[i])==True):
#        # del Obuk[i]
#Obuk=spike(Obuk,avgper)
#for i in range(len(Obuk)):
#    # stabD.append(stab(H,d,Obuk[i]))
#for i in range(len(stabD)-1,-1,-1):
#    # if abs(stabD[i])>10000:
#        # del stabD[i]

#Graph plotting
plt.plot(gen(frvelD),frvelD)
plt.plot(gen_avg(frvelD),avg(frvelD),"r")
plt.plot(time(timeD),frvelD)
plt.plot(gen_avg(time(timeD),frvelD),avg(frvelD),"r")
avgper=1800
plt.plot(gen_avg(time(timeD),frvelD),avg(frvelD),"y")
avgper=3600
plt.plot(gen_avg(time(timeD),frvelD),avg(frvelD),"w")

plt.plot(gen(Obuk),Obuk)
plt.plot(gen_avg(Obuk),avg(Obuk),"r")

plt.plot(gen(stabD),stabD)
plt.plot(gen_avg(stabD),avg(stabD),"r")

plt.plot(time(timeD),momfluxD)
plt.plot(gen_avg(time(timeD),momfluxD),avg(momfluxD),"r")
avgper=1800
plt.plot(gen_avg(time(timeD),momfluxD),avg(momfluxD),"y")
avgper=3600
plt.plot(gen_avg(time(timeD),momfluxD),avg(momfluxD),"w")
plt.gcf().autofmt_xdate()

for i in range(len(heatfluxD)-1,-1,-1):
    if abs(heatfluxD[i])>5:
        del heatfluxD[i]
delta=len(timeD)-len(heatfluxD)
for i in range(1,delta+1):
    del timeD[-1]
plt.plot(time(timeD),heatfluxD)

```



```

plt.plot(gen_avg(time(timeD),heatfluxD),avg(heatfluxD),"r")
avgper=1800
plt.plot(gen_avg(time(timeD),heatfluxD),avg(heatfluxD),"y")
avgper=3600
plt.plot(gen_avg(time(timeD),heatfluxD),avg(heatfluxD),"w")

#-----
print("End")
#-----
#Equation references
#[1] http://www.srh.noaa.gov/images/epz/wxcalc/vaporPressure.pdf
#[2] https://wahiduddin.net/calc/density\_altitude.htm
#[3] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/shegas.html

```

11 Lihtlitsents

Mina, Jorma Veiderpass

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„HELIANEMOMEETRI MÕÕTMISANDMETEST MIKROMETEOROLOOGILISTE PARAMEETRITE ARVUTAMINE“

Mille juhendajaks on Erko Jakobson

(a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

(b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **26.05.2015**